

При определении предельного усилия, воспринимаемого бетоном шпонки,  $R_{b,k}$  принимают меньшим из значений  $R_{loc}$  и  $R_{sh}$ .

На основе теоретических решений получено оптимальное соотношение размеров шпонки  $\ell/h=1/4$  ( $\chi=0,1$ ), при котором ее несущая способность максимальная.

Для анкера с многшпоночной поверхностью учет неравномерности распределения напряжений по длине ствола производим путем умножения значения предельного усилия, воспринимаемого отдельной шпонкой, на коэффициент

$$\Phi_{b,k} = n(1,35 - 0,35\sqrt{n}), \quad (5)$$

где  $n$  – количество шпонок, вводимое в расчет (до 10 шпонок).

Таким образом, предлагаемый метод расчета несущей способности свайных анкеров с уширениями по длине ствола, учитывающий форму и размеры вовлекаемого в работу «тела выпора», вид грунта и его характеристики прочности, имеет достаточно хорошую для инженерной практики сходимость с данными натурного эксперимента.

1. Hazin S.V., Vynnykov Y.L. Modern Constructions of Pile Anchors with Widening at Shaft for Stabilization of Petroleum and Gas Pipelines and his Design // Proceedings of the International Conference on Coastal Geotechnical Engineering in Practice. – Atyrau, 2002. – P.320-323.

2. Винников Ю.Л., Хазін С.В., Пашенко А.М. Експериментально-теоретичні дослідження анкерів у пробитих свердловинах із розширеннями // Галузеве машинобуд., буд-во: Зб. наук. праць Полт. нац. техн. ун-ту ім. Юрія Кондратюка. Вип.10. – Полтава: ПНТУ ім. Юрія Кондратюка, 2002. – С. 44-49.

3. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.

4. Погрібний В.В., Довженко О.О. До розрахунку міцності шпонкових з'єднань // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. Вип. 2. – Рівне: Рівн. держ. техн. ун-т, 1999. — С. 135-140.

*Получено 24.12.2002*

УДК 624.014.046

С.Ф.ПИЧУГИН, д-р техн. наук, Н.В.БИБИК

*Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка*

## **УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ СТАЛЬНЫХ БАЛОК С РАСПОРОМ**

Рассматривается упруго-пластический изгиб двутавровых однопролетных балок с распором. Исследуется напряженно-деформированное состояние шарнирно закрепленных и жестко защемленных балок при глубоком развитии пластических деформаций. Рассматривается также влияние угла поворота опор на упруго-пластическую работу жестко закрепленной балки.

Исследованию упруго-пластического изгиба балок с распором посвящен ряд работ [1-3]. Однако большинство из них базировалось на упрощенных предположениях расчета, в частности, использовалась гипотеза пластического шарнира, идеализированные диаграммы работы материала, расчеты выполнялись в геометрически линейной постановке и при небольшой степени развития пластических деформаций. При таком подходе можно лишь приблизительно оценить перемещения балки и величину ее пластических деформаций.

Для более точного расчета балки с распором в упруго-пластической стадии ее следует рассматривать как геометрически нелинейную конструкцию и рассчитывать как жесткую нить с малой стрелой провисания (далее не будем различать термины “балка с распором” и “жесткая нить”).

В работе численно исследовали жесткие нити из прокатных профилей (двутавровые балки 10Б1 и 14Б1) пролетом 6 м, с опорами, расположенными на одном уровне. Рассматривали действие равномерно распределенной по всему пролету нагрузки, которая делилась на начальную и дополнительную. Под начальной подразумевалась нагрузка, от которой не возникал распор (конструкция представляла собой свободнолежащую балку). После приложения начальной нагрузки опоры балок фиксировали шарнирно или жестко. Величина поворота опор при жестком закреплении определялась значением угла выхода свободнолежащей балки от действия начальной нагрузки (величина ее варьировалась). Для балок 10Б1 углы поворота опор принимали  $0,1^{\circ}$ ,  $1^{\circ}$  и  $2^{\circ}$ , для 14Б1 –  $0,06^{\circ}$ ,  $0,5^{\circ}$ ,  $1^{\circ}$  и  $1,5^{\circ}$ . При дальнейшем нагружении конструкция работала как жесткая нить с распором.

Основными предположениями расчета являлись гипотеза плоских сечений, простое нагружение и плоский изгиб нити. Расчет проводили по деформированной схеме, линию прогибов нити описывали конечным числом точек, для каждой записывали условия равновесия изгибающих моментов и продольных сил [4, 5]. Для вычисления производных использовали конечно-разностную аппроксимацию. Распор находили с помощью уравнения неразрывности деформаций. Внутренние усилия определяли «наложением» диаграммы работы на сечение [6]. Систему нелинейных уравнений относительно линии провисания и распора решали дискретным методом Ньютона.

Материал конструкций – малоуглеродистая сталь марки Ст3 с протяженной площадкой текучести. В исследованиях использовали реальную диаграмму работы, которую задавали таблично. Промежуточные значения  $\sigma(\epsilon)$  находили сплайн-интерполяцией 1 или 2 поряд-

ка. Характерные точки диаграммы работы материала приведены в таблице.

Предел упругости		Начало площадки текучести		Конец площадки текучести		Предел временного сопротивления	
$\sigma_{el}$ , МПа	$\varepsilon_{el}$	$\sigma_y$ , МПа	$\varepsilon_y^0$	$\sigma_y$ , МПа	$\varepsilon_y^1$	$\sigma_u$ , МПа	$\varepsilon_u$
219	0,0011	240	0,0019	240	0,0297	396	0,160

Исследовали напряженно-деформированное состояние элемента при глубоком развитии пластических деформаций по высоте сечения и длине нити. Расчет производили до величины относительной деформации в максимально загруженном сечении  $\varepsilon_{max}=30\varepsilon_{el}$ . Изучали прогибы элементов, возникающий в них распор, распределение внутренних усилий по длине и степень развития пластических деформаций по высоте для характерных сечений.

Полученные результаты приведены на графиках рис.1-5.

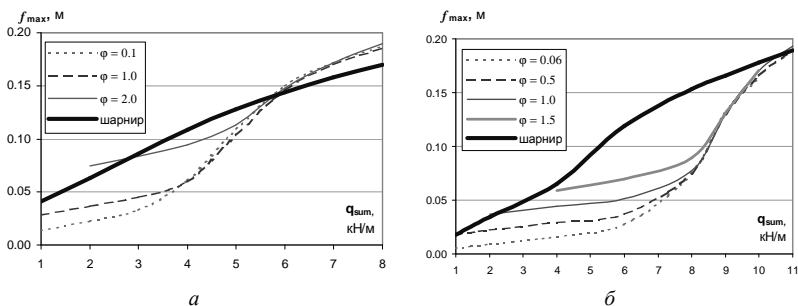


Рис.1 – Зависимость максимального прогиба от нагрузки: а – для I10B1; б – для I14B1

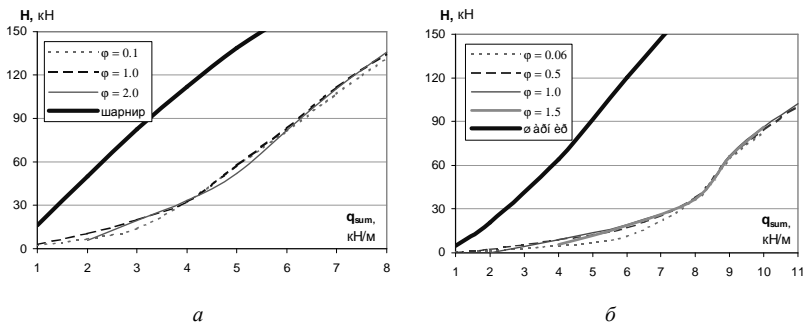


Рис.2 – Зависимость распора от нагрузки: а – для I10B1; б – для I14B1

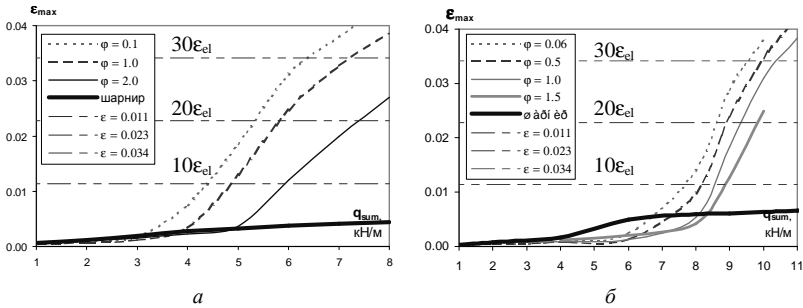


Рис.3 – Зависимость максимального удлинения от нагрузки:  
а – для И10Б1; б – для И14Б1

На рис.1 приведена зависимость максимального прогиба балки  $f_{max}$  от нагрузки  $q_{sum}$ . При выбранной схеме загрузения  $f_{max}$  находится в середине пролета. При упругой работе балок ( $q_{sum} \leq 3$  кН/м для И10Б1 и  $q_{sum} \leq 4$  кН/м для И14Б1) максимальный прогиб для жесткого варианта закрепления опор в 2-3 раза меньше прогиба при шарнирной схеме. С увеличением  $q_{sum}$  интенсивность роста  $f_{max}$  при жесткой схеме меньше, чем при шарнирной. С началом пластической работы балок ( $\epsilon_{max} > \epsilon_{el}$  в интервале нагрузки  $q_{sum}$  от 3 до 5 кН/м для И10Б1 и от 5 до 9 кН/м для И14Б1) скорость роста  $f_{max}$  для жесткого варианта увеличивается и значения прогибов приближаются к прогибам при шарнирном варианте. При дальнейшем развитии пластических деформаций ( $\epsilon_{max} > 10\epsilon_{el}$ ) прогибы  $f_{max}$  для обоих вариантов закрепления опор сравниваются, а для И10Б1 прогибы по жесткому варианту даже на 10-12% превышают прогибы при шарнирном варианте. Угол поворота опор  $\varphi$  влияет на  $f_{max}$  при упругой и в начале пластической работы. С увеличением угла выхода балки на опорах возрастает и ее максимальный прогиб. С ростом пластических деформаций прогибы для балок с различными углами поворота опор сближаются и дальше растут одинаково.

Рис.2 отражает зависимость распора  $H$  от нагрузки  $q_{sum}$  для балок И10Б1 и И14Б1. При шарнирном креплении опор распор в несколько раз больше, чем при жестком на всем диапазоне нагрузки. Для более жесткого сечения И14Б1 значения распора при шарнирной и жесткой схеме отличаются сильнее, чем для сечения И10Б1 (для И10Б1  $H_{шарн}/H_{жестк} = 3 \div 4$ , а для И14Б1  $H_{шарн}/H_{жестк} = 5 \div 6$ ). Величина угла поворота опор незначительно влияет на значение распора, графики для всех углов поворота практически совпадают.

Рис.3 характеризует степень развития пластических деформаций в крайнем волокне наиболее загруженного сечения балки ( $\varepsilon_{max}$ ) при увеличении нагрузки. Для шарнирно закрепленной балки это нижнее волокно сечения в середине пролета, а для жестко закрепленной – верхнее волокно опорного сечения. Дополнительные горизонтальные пунктирные линии на рис.3 соответствуют 10, 20 и 30 упругим деформациям. В шарнирно закрепленной балке  $\varepsilon_{max}$  плавно возрастает с ростом нагрузки. Для графиков  $\varepsilon_{max}(q_{sum})$  жестко защемленной балки характерно резкое увеличение значений  $\varepsilon_{max}$  при достижении пластических деформаций  $\varepsilon > 3\varepsilon_{el}$ . Это происходит из-за резкого увеличения кривизны на опоре (значение кривизны на опоре в 20-30 раз больше, чем в пролете).

Угол поворота опор существенно влияет на значение  $\varepsilon_{max}$  для жесткого варианта. С увеличением угла  $\varphi$  графики не меняют свой характер, а смещаются в сторону увеличения нагрузки. Таким образом, угол  $\varphi$  снижает степень развития пластических деформаций при одинаковой нагрузке для балок с жестким закреплением опор. Например, для балки 14Б1 при нагрузке  $q_{sum} = 8$  кН/м деформация  $\varepsilon_{max}$  при  $\varphi = 0,06^\circ$  в 3 раза больше деформации при  $\varphi = 1,0^\circ$ .

Далее проанализируем распределение внутренних усилий по длине балки при росте нагрузки. С учетом вида нагрузки, продольная сила  $N$  равномерно распределена по длине элемента. Она максимальна вблизи опор и несколько уменьшается к середине балки, разница между  $N_{max}$  и  $N_{min}$  составляет 1-2%, с увеличением нагрузки  $N$  плавно возрастает. При малых прогибах балок значения продольной силы и распределения примерно равны.

Эпюры изгибающих моментов для балки П14Б1 представлены на рис.4. Из графиков видно, что при значениях нагрузки  $q_{sum}$  до 4 кН/м распределение моментов по длине элемента напоминает эпюру моментов для безраспорной балки. Однако с дальнейшим ростом  $q_{sum}$  значение изгибающего момента в середине пролета, достигнув максимума при определенной нагрузке, начинает уменьшаться, а эпюра моментов выравнивается по длине элемента. Например, для шарнирного варианта (рис.4, б) максимальный момент  $M_{\xi=0,5} = 14$  кНм при нагрузке  $q_{sum} = 4$  кН/м, а при максимальной нагрузке  $q_{sum} = 12$  кН/м значение момента  $M_{\xi=0,5} = 4,5$  кНм (где  $\xi$  – относительная координата по длине элемента). Для жесткой схемы (рис.4, а) максимальное значение изгибающего момента достигается при нагрузке  $q_{sum} = 8$  кН/м, причем зна-



На рис.5 приведены эпюры нормальных напряжений  $\sigma(h)$  для балки П14Б1. Балка с распором – это растянуто-изогнутый элемент, нормальные напряжения в котором вычисляются путем суммирования напряжений от растяжения и изгиба.

При нагрузке  $q_{sum} = 4$  кН/м балка с жестким закреплением опор работает упруго, максимальные напряжения имеют место в нижнем волокне сечения в середине пролета. Изгибающий момент вносит больший вклад в эпюру  $\sigma(h)$  по сравнению с продольной силой, нейтральная линия находится почти посередине сечения. В балке с шарнирно неподвижными опорами при этой же нагрузке в середине пролета уже начинаются пластические деформации ( $\varepsilon_{max} \approx \varepsilon_{el}$ ,  $\sigma_{max} \approx 240$  МПа).

При нагрузке  $q_{sum} = 8$  кН/м происходит дальнейшее развитие пластических деформаций, нейтральная линия перемещается вверх за счет увеличения продольной силы. В балке с жестким закреплением опор появляются пластические деформации ( $\varepsilon_{max} \approx 4\varepsilon_{el}$ ). Шарнирно закрепленная балка имеет большую степень развития пластических деформаций ( $\varepsilon_{max} \approx 6\varepsilon_{el}$ ), уменьшается зона сжатия, увеличивается зона растяжения.

При нагрузке  $q_{sum} = 12$  кН/м в балке с шарнирно неподвижными опорами во всех рассматриваемых сечениях наблюдается растяжение, вид эпюр определяет продольная сила, достигающая своего максимума, а момент – минимума с начала нагружения (см. рис.4, б). Степень развития пластических деформаций в нижнем волокне среднего сечения  $\varepsilon_{max} \approx 7\varepsilon_{el}$ . В верхнем волокне опорного сечения жестко защемленной балки за счет резкого увеличения кривизны, деформации достигают значения  $\varepsilon_{max} > 30\varepsilon_{el}$ . Напряжения при этом составляют  $\sigma_{max} = 280$  МПа, следовательно, балка работает в стадии упрочнения материала.

Таким образом, с использованием теории жестких нитей выполнен комплекс численных исследований напряженно-деформированного состояния двутавровых однопролетных балок с распором, выполненных из малоуглеродистой стали с протяженной площадкой текучести. При этом допускалось значительное развитие пластических деформаций ( $\varepsilon_{max} > 30\varepsilon_{el}$ ).

По сравнению с шарнирным закреплением опор использование жесткого защемления в 3-4 раза уменьшает значение распора как в упругой, так и в пластической стадии работы балок. При деформациях  $\varepsilon_{max} < 10\varepsilon_{el}$  максимальный прогиб для жесткой схемы в 1,5-2 раза

меньше прогиба для шарнирной схемы. При дальнейшем развитии пластических деформаций прогибы жестко и шарнирно закрепленной балки сближаются. С увеличением жесткости балки эффект уменьшения распора и максимального прогиба возрастает.

Изменение угла поворота опор для жестко защемленной балки оказывает существенное влияние на ее напряженно-деформированное состояние в упруго-пластической стадии работы.

Выполняемые исследования позволяют дать в дальнейшем конкретные рекомендации по оптимальному использованию стальных балок с распором в несущих конструкциях промышленных зданий.

1. Бубнов И.Г. Труды по теории пластин. – М.: Гостехиздат, 1953.

2. Бельский Л.М. Расчет судовых конструкций в пластической стадии. – Л.: Судостроение, 1983. – 448 с.

3. Ершов Н.Ф. Упруго-пластический расчет пластин с распором // Прикладная механика. – 1963. – №6.

4. Шимановский В.Н., Соколов А.А. Расчет висячих конструкций за пределом упругости – К.: Будівельник, 1975. – 104 с.

5. Пічугін С.Ф., Бібік М.В. Розрахунок сталевих елементів покриття із залишковими прогинами // Будівництво та техногенна безпека: Зб. наук. праць. Вип.6. – Сімферополь, 2002. – С.188-190.

6. Биби́к Н.В. Определение внутренних усилий при расчете внецентренно нагруженных элементов конструкций из материала с протяженной площадкой текучести // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. Вип.5. – Рівне, 2001. – С.133-138.

Получено 20.12.2002

УДК 693.54.022.5

Н.П.ВОДОВОЗОВ, канд. техн. наук, В.Л.ЗАЙЦЕВ

ВАТ "Південспецбуд", м.Харків

М.Г.ДЮЖЕНКО, д-р техн. наук

Харківська державна академія міського господарства

## **ЩОДО СТАБІЛІЗАЦІЇ І ПРОДОВЖЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ МІСЬКОГО ЖИТЛОВОГО ФОНДУ – ПЕРШІЙ ДОСВІД САНАЦІЇ ТРУБОПРОВІДІВ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ м.ХАРКІВА**

Розглядаються результати першого досвіду санації водоводу Харківської системи водопостачання у виконанні спеціалістів з Німеччини. Дасться порівняння зарубіжної технології з вітчизняними розробками. Обґрунтовується перевага вітчизняних розробок перед зарубіжними.

В Україні склалася надзвичайна ситуація в галузі водопостачання, де значна частина трубопроводів (понад 70 тис. км) побудована свого часу із застосуванням сталевих труб. Головним їх недоліком є те, що вони піддаються корозії та заростанню, а це призводить до зменшення